

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 798 463

②1 N° d'enregistrement national : 99 11530

⑤1 Int Cl<sup>7</sup> : G 01 N 9/00, G 21 C 17/06

⑫

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 15.09.99.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 16.03.01 Bulletin 01/11.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : SOCIETE FRANCO-BELGE DE  
FABRICATION DE COMBUSTIBLE - FBFC Société en  
nom collectif — FR.

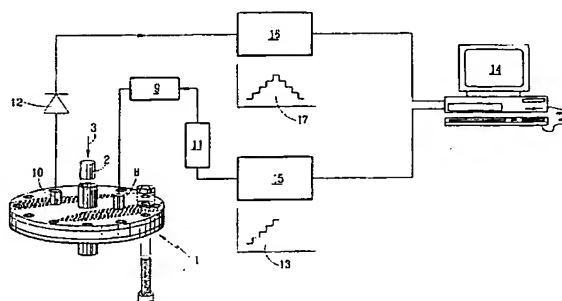
⑦2 Inventeur(s) : DE TOLLENAERE LUC.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : CABINET LAVOIX.

⑤4 PROCÉDE ET DISPOSITIF DE CONTROLE DE LA DENSITE D'ELEMENTS EN UN MATERIAU COMPACTE,  
TEL QUE DES PASTILLES DE COMBUSTIBLE NUCLEAIRE.

⑤7 On introduit les éléments (2) l'un à la suite de l'autre dans une cavité d'un résonateur (1), on soumet le résonateur (1) à un signal à haute fréquence dont on fait varier la fréquence dans un intervalle prédéterminé, on détecte un signal électrique de sortie du résonateur (1), on détermine la fréquence de résonance du résonateur (1) en présence de l'élément (2) dans sa cavité, à partir des variations du signal de sortie et on détermine, à partir de la fréquence de résonance du résonateur en présence de l'élément (2), la valeur ou la conformité par rapport à une valeur de référence de la densité du matériau de l'élément (2). On peut déterminer, à partir de la fréquence de résonance du résonateur (1) en présence de l'élément (2) la constante diélectrique relative ( $\epsilon_r$ ) du matériau de l'élément (2) et la densité du matériau par rapport à une densité théorique.



FR 2 798 463 - A1



L'invention concerne un procédé de contrôle de la densité d'éléments en un matériau compacté, tel que des pastilles de combustible nucléaire.

Les assemblages de combustible utilisés pour constituer le cœur d'un réacteur nucléaire, par exemple le cœur d'un réacteur nucléaire refroidi par de l'eau sous pression, sont généralement constitués par des éléments combustibles appelés crayons, assemblés entre eux sous la forme d'un faisceau dans lequel les crayons de combustible de forme cylindrique allongée sont parallèles entre eux.

Chacun des crayons est constitué par un tube de gainage dans lequel sont empilés des pastilles de combustible de forme cylindrique.

Les pastilles de combustible sont obtenues par compactage et frittage d'une poudre constituée par exemple par de l'oxyde d'uranium  $UO_2$ .

Le contrôle de la masse spécifique des pastilles de combustible nucléaire est un contrôle extrêmement important, du fait de l'influence majeure de ce paramètre sur le comportement du combustible dans le réacteur nucléaire. En effet, des variations de la masse spécifique des pastilles (ou de la densité de ces pastilles par rapport à la densité théorique du matériau combustible) induisent des variations de flux thermique dans le réacteur.

Il est donc nécessaire de contrôler la masse spécifique ou la densité des pastilles de combustible, à l'issue de la fabrication. Dans les usines de fabrication de pastilles de combustible, on effectue généralement un contrôle par échantillonnage, sur des pastilles qui ont été prélevées sur la fabrication. On effectue sur les pastilles constituant les échantillons prélevés, des mesures de densité par une méthode telle que la pycnométrie au mercure ou au gaz, la mesure de la densité à partir de la poussée d'Archimède lors de l'immersion des pastilles ou encore la mesure géométrique des pastilles.

Toutes ces techniques présentent des inconvénients :

- la pycnométrie au mercure ou au gaz, qui doit s'effectuer sous vide ou sous pression, est une méthode peu pratique, longue et destructrice ;
- la mesure par poussée d'Archimède nécessite de multiples manipulations successives et altère le produit qui doit être soigneusement séché, si l'on veut l'utiliser pour le chargement d'un crayon de combustible. De plus, les équipements de pesée, qui doivent être extrêmement précis, sont sensi-

bles aux variations ambiantes, par exemple de température et doivent être localisés dans une enceinte climatisée. Il faut également effectuer la mesure à l'aide d'un produit mouillant. Les pesées successives dans l'eau et dans l'air sont donc longues ;

- 5           - enfin, la mesure géométrique ne permet qu'une détermination approchée car elle ne tient pas compte des aspérités de surface des pastilles (par exemple porosité ouverte des pastilles).

De manière générale, toutes les mesures globales effectuées sur les pastilles, par exemple des mesures de volume, sont des mesures qui peuvent faire intervenir des paramètres entraînant des erreurs sur la mesure de la masse spécifique, par exemple des défauts de surface ou des éclats sur les pastilles.

Dans le cas de mesures effectuées par immersion, on a proposé, dans le EP-0.612.995, d'utiliser des robots de manipulation qui permettent d'accroître la rapidité et la productivité du procédé de contrôle.

Toutefois, il subsiste des défauts inhérents aux procédés de mesure par immersion qui ont été rappelés plus haut.

En outre, tous les procédés de mesure qui ont été mis en œuvre jusqu'ici ne permettent d'effectuer des déterminations de la densité des pastilles d'une fabrication que par échantillonnage.

Pour effectuer un contrôle efficace d'une fabrication, d'une manière telle qu'on puisse garantir les propriétés de tous les éléments combustibles fabriqués à partir des pastilles de la fabrication, il est souhaitable et même nécessaire d'effectuer un contrôle de la masse spécifique ou de la densité de chacune des pastilles de la fabrication, de manière continue, par un procédé rapide, précis et fiable et qui n'altère pas le produit.

On sait qu'il existe une relation linéaire entre la constante diélectrique d'un matériau compacté et/ou fritté tel que l'oxyde d'uranium  $UO_2$  et le pourcentage de porosités dans le matériau. En d'autres termes, il existe une relation quasi linéaire entre la constante diélectrique d'un tel matériau compacté et la densité du matériau, exprimée en pourcentage de la densité théorique du matériau.

Cependant, on n'a jamais proposé d'utiliser une telle propriété pour effectuer le contrôle de densité à 100 % et en continu d'une fabrication de pastilles compactées et frittées, telles que des pastilles de combustible nucléaire.

5           Le but de l'invention est donc de proposer un procédé de contrôle de la densité d'éléments de forme et de dimensions sensiblement constantes en un matériau compacté, tel que des pastilles de combustible de forme cylindrique, ce procédé permettant d'effectuer de manière, précise, rapide et fiable le contrôle en continu et à 100 % des éléments en sortie de fabrication industrielle.

10           Dans ce but, on introduit les éléments en continu, à la suite l'un de l'autre, dans une cavité d'un résonateur ayant une forme et une dimension déterminant sa fréquence propre de résonance à vide, adaptées à la forme et à la dimension des éléments, on soumet le résonateur à un signal à haute fréquence dont on fait varier la fréquence dans un intervalle prédéterminé, on détecte un signal électrique de sortie du résonateur, on détermine la fréquence de résonance du résonateur en présence de l'élément à partir des variations du signal de sortie, et on détermine, à partir de la fréquence de résonance du résonateur en présence de l'élément qui est dépendante de la constante diélectrique relative du matériau et de la fréquence propre du résonateur à vide, la valeur ou la conformité par rapport à une valeur de référence de la densité du matériau des éléments qui est liée à la constante diélectrique par une loi de corrélation.

20           L'invention est également relative à un dispositif permettant la mise en œuvre du procédé de contrôle suivant l'invention.

25           Afin de bien faire comprendre l'invention, on va décrire à titre d'exemple en se référant aux figures jointes en annexe, un dispositif permettant la mise en œuvre d'un procédé de contrôle suivant l'invention utilisé pour effectuer le contrôle en continu à 100 % de la densité de pastilles de combustible nucléaire provenant d'une fabrication industrielle.

30           La figure 1 est une vue schématique du dispositif utilisé pour mettre en œuvre le procédé de contrôle de densité.

La figure 2 est une vue en perspective éclatée du résonateur du dispositif représenté sur la figure 1.

Les figures 3A à 3F sont des diagrammes donnant différents paramètres, en fonction de la densité, des pastilles de matériau combustible.

5 Le procédé selon l'invention est mis en œuvre pour contrôler en continu et à 100 % la densité de pastilles frittées en un matériau combustible nucléaire tel que l'oxyde d'uranium  $UO_2$ , en sortie d'une ligne de fabrication industrielle.

10 Le procédé suivant l'invention peut être mis en œuvre pour déterminer la densité ou la masse spécifique de chacune des pastilles de la fabrication ou encore pour déterminer si la masse spécifique ou densité est conforme à des exigences de fabrication déterminées.

15 Le procédé suivant l'invention permet également de déterminer en continu la masse linéique des pastilles, c'est-à-dire la masse des pastilles par unité de longueur, en effectuant une mesure de diamètre sur chacune des pastilles, par exemple en sortie d'une unité de rectification des pastilles. La longueur des pastilles, qui sont amenées à défiler en contact bout à bout peut être mesurée en utilisant des palpeurs ou un laser.

20 Chacune des pastilles de la fabrication présente par exemple une forme cylindrique, une longueur qui peut être comprise entre 10 et 15 mm et un diamètre de l'ordre de 8 à 9 mm.

25 Le contrôle (ou la mesure de la densité, de la masse spécifique ou de la masse linéique des pastilles) est effectué en mesurant la variation de la fréquence de résonance d'un résonateur excité par un courant haute fréquence, due à la présence d'une pastille de combustible dans le résonateur.

Comme il sera expliqué plus loin, pour le contrôle de pastilles cylindriques, on utilise un résonateur ayant une cavité cylindrique.

30 On exploite le résonateur en mode  $TM_{010}$ , c'est-à-dire en mode transversal magnétique, de telle sorte que la fréquence de résonance dépende seulement du diamètre du résonateur. La fréquence de résonance du résonateur à vide peut être donnée par la formule :

$$f_0 = \frac{2,405 c}{\pi D} \quad (1)$$

avec  $f_0$  : fréquence de résonance du résonateur à vide,

$c$  : vitesse de la lumière,

$D$  : diamètre du résonateur.

Lorsqu'on charge le résonateur par introduction d'une pastille en oxyde d'uranium  $UO_2$  fritté au centre de la cavité, la fréquence de résonance du résonateur est modifiée, de sorte que cette fréquence prenne une valeur  $f_1$ .

La mesure de la fréquence de résonance  $f_1$  en présence d'une pastille et la détermination de la différence  $\Delta f = f_0 - f_1$  entre la fréquence de résonance à vide et la fréquence de résonance à l'état chargé du résonateur permet de calculer la constante diélectrique relative du matériau de la pastille par la relation :

$$\epsilon_r = 1 + 0,539 \cdot \frac{D^2}{d^2} \cdot \frac{(\Delta f)}{f_0} \quad (2)$$

dans laquelle :

$D$  est le diamètre du résonateur,

$d$  est le diamètre de la pastille,

$f_0$  est la fréquence de résonance du résonateur à vide,

$\Delta f$  est la variation de fréquence du résonateur entre les états à vide et perturbé, et

$\epsilon_r$  est la constante diélectrique relative du matériau de la pastille.

Pour obtenir une mesure précise, il est nécessaire que le diamètre de l'élément perturbant, c'est-à-dire de la pastille soit très inférieur au diamètre du résonateur.

Sur la figure 1, on a représenté de manière schématique une installation permettant d'effectuer le contrôle de pastilles de combustible par le procédé suivant l'invention.

Le dispositif représenté sur la figure 1 comporte un résonateur 1 ayant une cavité cylindrique dans laquelle on introduit les unes à la suite des autres des pastilles de combustible 2, suivant la direction verticale axiale 3 du résonateur, de manière que les pastilles soient introduites en continu

dans le résonateur et constituent pratiquement un train de pastilles continu en défilement dans la cavité du résonateur.

Comme représenté sur la figure 2, le résonateur 1 peut être constitué à partir d'éléments en forme de disques 4a, 4b et 5 qui sont rapportés l'un sur l'autre et fixés entre eux par des ensembles à vis et écrous 6, 6', les vis étant engagées dans des ouvertures périphériques alignées des disques 4a, 4b et 5.

Le disque 5, de forme annulaire, qui est intercalé entre les disques 4a et 4b dans la position de montage du résonateur, comporte une ouverture interne circulaire dont les disques d'extrémité 4a et 4b assurent la fermeture dans la position de montage du résonateur. L'ouverture interne du disque annulaire 5 fermée par les disques d'extrémité 4a et 4b constitue la cavité du résonateur de diamètre D et de hauteur h.

Le diamètre D est très supérieur au diamètre des pastilles de matériau combustible nucléaire. La hauteur h de la cavité du résonateur est en revanche inférieure à la longueur des pastilles 2 en matériau combustible. Par exemple pour une géométrie particulière de pastilles, le diamètre de la cavité peut être de 50 à 100 mm pour des diamètres de pastilles de 8 à 9 mm et la hauteur h peut être de l'ordre de 8 à 10 mm. On peut ainsi effectuer des mesures individuelles sur chacune des pastilles en défilement dans la partie centrale de la cavité du résonateur 1.

Les disques d'extrémité 4a et 4b de fermeture de la cavité du résonateur comportent, dans leur partie centrale, un tube de guidage respectif 7a et 7b, les tubes 7a et 7b étant placés avec leurs axes alignés et coaxialement par rapport à la cavité du résonateur 1. Les tubes 7a et 7b permettent de guider les pastilles de combustible, de manière à leur faire traverser la cavité du résonateur, dans une disposition coaxiale par rapport à cette cavité.

Les disques constituant le résonateur sont généralement réalisés en cuivre et parfaitement polis et les tubes de guidage 7a et 7b des pastilles de combustible peuvent être revêtus intérieurement de téflon qui ne présente aucun risque de nocivité vis à vis des pastilles, pour permettre un meilleur

glissement des pastilles de combustible pour éviter toute détérioration de ces pastilles, lors de leur passage dans le résonateur.

L'un des disques 4a d'extrémité du résonateur est traversé par des ouvertures dans lesquelles sont engagées une première antenne 8 permettant d'appliquer un signal d'entrée haute fréquence au résonateur et une se-  
5       conde antenne 10 constituant un détecteur.

Comme il est visible sur la figure 1, la première antenne 8 est reliée par l'intermédiaire d'un isolateur 9 à un oscillateur de commande 11. L'os-  
10       cillateur 11 permet de transmettre vers le résonateur un signal haute fréquence d'excitation du résonateur.

L'oscillateur 11 qui constitue une source de signal haute fréquence est commandé par une tension variable permettant de régler la fréquence du signal produit. Un tel oscillateur commandé par un courant de tension varia-  
15       ble est généralement désigné par l'appellation VCO (Voltage Controlled Oscillator).

Les antennes 8 et 10 sont des antennes couplées capacitives. L'an-  
tenne 8 reçoit de l'oscillateur 11, un signal à très haute fréquence dont la fréquence peut être comprise entre 2 et 4 GHz, c'est-à-dire un signal d'une fréquence située dans la régions des micro-ondes. Cette zone de fréquence.  
20       a été choisie pour transmettre les signaux sans contact électrique, par l'intermédiaire des antennes capacitives.

L'oscillateur 11, qui est constitué par un dispositif électronique ampli-  
ficateur comportant un transistor, est piloté par une tension de commande V représentée sur le graphique indiqué par la référence 13 sur la figure 1. La  
25       tension de commandé V peut être réglée par pas entre 0 et 45 volts, de manière à régler la fréquence du signal produit par le VCO, successivement à plusieurs fréquences parfaitement définies et comprises dans l'intervalle de 2 à 4 GHz. La commande du VCO est réalisée à partir d'un micro-ordinateur 14 auquel est associée une carte A/D 15 de conversion des signaux digitaux  
30       en signaux analogiques ou, inversement, de conversion de signaux analogiques en signaux digitaux.

Les signaux haute fréquence sont transmis à l'antenne capacitive 8, par l'intermédiaire de l'isolateur 9 qui permet d'absorber l'énergie réfléchie



par le résonateur (due à une mauvaise adaptation de l'impédance), de sorte que le fonctionnement du VCO ne soit pas influencé par les signaux réfléchis.

5 L'antenne 10 est reliée à un détecteur 12 constitué par une diode qui est sensible aux fréquences dans la région des micro-ondes et qui fournit une tension continue variable en fonction de l'amplitude du champ électromagnétique produit dans le résonateur. La tension continue variable fournie par la diode est transmise par l'intermédiaire d'une carte de conversion A/D 16 au micro-ordinateur 14.

10 Le signal de tension fourni par le détecteur 12 constitué par une diode est représenté par un graphique sous la référence 17 sur la figure 1.

Le principe de la mesure est le suivant.

On introduit l'une à la suite de l'autre, de manière continue, par déplacement dans la direction de la flèche verticale 3, des pastilles de matériau 15 combustible 2, dans la partie centrale axiale de la cavité du résonateur 1.

On a déterminé, préalablement, la fréquence de résonance à vide  $f_0$  de la cavité du résonateur 1.

20 Pour déterminer la fréquence  $f_1$  du résonateur perturbé par la présence d'une pastille 2, on commande, à partir du micro-ordinateur 14, la tension de commande du VCO 11, de manière à obtenir un balayage en fréquence entre 2 et 4 GHz, cette variation étant obtenue par augmentation par pas de la tension de commande entre 0 et 45 volts. La variation correspondante de la fréquence est sensiblement linéaire dans une partie de l'intervalle de fréquences entre 2 et 4 GHz.

25 Le détecteur 12 relié à l'antenne de mesure 10 fournit une tension continue dont l'amplitude est proportionnelle à l'amplitude du champ magnétique dans la cavité du résonateur. Le micro-ordinateur 14 recevant le signal de tension continue de la diode 12 par l'intermédiaire de la carte A/D 16 permet de déterminer la fréquence du signal d'excitation pour laquelle la 30 tension de la diode passe par un maximum. Cette fréquence correspond à la fréquence de résonance  $f_1$  du résonateur en présence de la pastille 2.

Le calculateur permet de déterminer la fréquence  $\Delta f = f_0 - f_1$  et à partir de cette différence de fréquence, la constante diélectrique relative  $\epsilon_r$ , à partir de la formule (2) donnée ci-dessus.

5 La valeur calculée de la constante diélectrique  $\epsilon_r$  peut être utilisée pour déterminer la masse spécifique ou la proportion de la densité théorique de la pastille de combustible, à partir d'une courbe d'étalonnage donnant la masse spécifique ou la densité relative du matériau combustible nucléaire, en fonction de sa constante diélectrique relative.

10 La courbe d'étalonnage est pratiquement une droite, la relation entre la constante diélectrique relative et la densité (ou le pourcentage de porosités) d'un matériau fritté tel que l'oxyde d'uranium  $UO_2$  étant quasi linéaire.

Une telle courbe d'étalonnage relative à l'oxyde d'uranium  $UO_2$  est donnée par exemple dans un article de D. J. HUNTLEY "The dielectric constant of  $UO_2$  and its variation with porosity" paru dans la revue Canadian  
15 Journal of Physics, vol. 44 (1966).

Il est possible également d'établir, préalablement aux mesures, une courbe d'étalonnage relative au matériau compacté fritté sur lequel on réalise les mesures.

20 Les données d'étalonnage sont introduites dans le micro-ordinateur 14 qui permet de déterminer directement la densité par rapport à la densité théorique des pastilles ou encore la masse spécifique des pastilles.

Il est possible également, comme indiqué plus haut, en réalisant des mesures de diamètre et de longueur sur les pastilles, de déterminer la masse linéique des pastilles, c'est-à-dire la masse par unité de longueur de  
25 ces pastilles.

On entre également dans le micro-ordinateur 14 des valeurs limites pour le paramètre choisi, qu'il s'agisse de la masse spécifique, de la densité ou de la masse linéique, de manière à réaliser un contrôle des pastilles à 100 % et en continu, au cours de la fabrication des éléments de combustible. Lorsque le micro-ordinateur 14 détecte une valeur du paramètre choisi  
30 en dehors de l'intervalle prédéterminé, un signal est émis et/ou la pastille sur laquelle on a mesuré une valeur non satisfaisante du paramètre est éliminée de la fabrication.

De manière habituelle, on vérifiera que la densité (ou la masse spécifique ou linéique) est supérieure à une valeur limite prédéterminée.

Il est possible également d'effectuer le contrôle sans calcul de la densité ou de la masse spécifique ou linéique et même sans calcul de la constante diélectrique, en réalisant un étalonnage à partir des fréquences de résonance.

Lorsque la fréquence de résonance de la cavité 1 en présence d'une pastille dépasse une certaine valeur prédéterminée, on émet un signal ou on élimine la pastille de la fabrication.

Le procédé suivant l'invention peut donc être utilisé comme procédé de contrôle de fabrication ou comme procédé de mesure d'un paramètre.

Dans tous les cas, la mesure est effectuée suivant la hauteur de la cavité qui est inférieure à la longueur d'une pastille, cette hauteur étant définie en fonction de la longueur d'onde du signal transmis par l'électrode 8 à la cavité du résonateur. Pour obtenir des valeurs représentatives des fréquences de résonance dans la cavité en présence des pastilles, il est nécessaire que la file de pastilles 2 introduites dans la cavité du résonateur par l'intermédiaire des tubes de guidage 7a et 7b soit pratiquement continue, les pastilles étant en contact bout à bout. Cette disposition de la file de pastilles permet également de réaliser des mesures précises de longueur des pastilles.

La qualité des mesures dépend du facteur de qualité  $Q$  du résonateur. Ce facteur de qualité  $Q$  est donné par la formule  $Q = f_r/df(-3dB)$ . Dans cette formule,  $f_r$  est la fréquence de résonance et  $df(-3dB)$  est la largeur du pic de résonance à 3 décibels du pic relatif à la résonance. Le facteur de qualité  $Q$  définit donc la variation d'amplitude du signal autour de la fréquence de résonance. Bien entendu, plus le paramètre largeur du pic de résonance à 3 décibels en-dessous du maximum du pic est faible, c'est-à-dire plus le pic est étroit, meilleure est la mesure de la fréquence de résonance  $f_r$ . On recherche donc des valeurs élevées du facteur de qualité  $Q$  et en particulier des valeurs supérieures à 1700 pour effectuer des mesures précises de la fréquence de résonance.

Lors de l'introduction d'une pastille dans la cavité du résonateur, il se produit un élargissement du pic de résonance et donc le facteur de qualité  $Q$  diminue.

5 A partir de la diminution du facteur de qualité  $Q$ , on peut calculer les pertes diélectriques de la pastille. Les pertes diélectriques  $\epsilon''$  caractérisent l'absorption des micro-ondes dans le matériau de la pastille. La valeur complexe des pertes diélectriques  $\epsilon^*$  est définie par la formule :  $\epsilon^* = \epsilon' + j \epsilon''$ . Le rapport  $\epsilon''/\epsilon'$  des parties imaginaire et réelle des pertes diélectriques donne la valeur du paramètre  $\tan \delta$ ,  $\delta$  étant l'angle de pertes diélectriques.

10 La valeur  $\epsilon'$  étant pratiquement constante, la partie imaginaire  $\epsilon''$  ou le paramètre  $\tan \delta$  sont représentatifs des pertes diélectriques dues à la pastille, c'est-à-dire à la puissance d'énergie électromagnétique absorbée par la pastille dans la cavité.

15 Ces paramètres, qui peuvent être calculés à partir des caractéristiques du pic de résonance du résonateur en présence d'une pastille, ainsi que le facteur de qualité pourraient être utilisés éventuellement pour effectuer le contrôle de densité des pastilles. On compare pour cela la valeur du paramètre à une valeur prédéterminée correspondant à une valeur limite de la densité.

20 On peut augmenter le facteur de qualité  $Q$  du résonateur à vide en augmentant la qualité de surface des parois de la cavité du résonateur, par exemple en effectuant un électropolissage sur les pièces de cuivre délimitant la cavité.

25 A titre d'illustration des différentes variantes du procédé de l'invention, on a effectué des mesures sur des pastilles en oxyde d'uranium  $UO_2$  dont les densités ont été ajustées à des valeurs différentes et parfaitement déterminées, comprises entre 80 et 100 % de la densité théorique.

Chacune des pastilles d'un type donné (numérotée de 1 à 12) présente un diamètre voisin de 8 mm qui est mesuré de manière très précise.

30 On mesure la fréquence de résonance à vide du résonateur  $f_0$  et la fréquence de résonance  $f_r$  à l'état perturbé, en présence de chacune des pastilles successivement.

On mesure et on calcule de plus, pour chacune des pastilles, l'amortissement du signal dB, le facteur de qualité  $Q$ , la constante diélectrique relative  $\epsilon_r$ , la partie imaginaire des pertes diélectriques  $\epsilon''$  et le paramètre  $\text{tg}\delta$ .

Les résultats sont reportés dans le tableau ci-dessous.

N° PASTILLE	DENSITE / DENS. TH. %	d mm	f <sub>r</sub> (mesuré)	dB signal	Q	ε <sub>r</sub> (mesuré)	tg δ	ε"
1	81,50	8,19	3270,5	-23,8	95,0	5,7	1,81E-02	1,03E-01
2	81,71	8,18	3267,5	-42,0	16,0	5,7	1,83E-01	7,91E-01
3	87,60	8,19						
4	87,81	8,19	3250,0	-43,0	6,0	5,8	3,71E-01	2,17E+00
5	90,77	8,18	3231,0	-38,0	18,0	6,0	1,17E-01	7,00E-01
6	90,80	8,18	3227,0	-38,0	18,0	6,0	1,17E-01	6,99E-01
7	94,16	8,08	3241,0	-36,0	24,0	6,0	8,77E-02	5,29E-01
8	94,42	8,08	3242,0	-35,0	28,0	6,0	7,44E-02	4,48E-01
9	95,96	8,05	3223,0	-36,0	25,0	6,2	8,23E-02	5,10E-01
10	95,99	8,05	3233,0	-36,0	25,0	6,1	8,32E-02	5,10E-01
11	97,55	8,03	3241,0	-29,5	52,0	6,1	3,73E-02	2,27E-01
12	97,68	8,03	3218,0	-30,7	48,0	6,3	3,98E-02	2,49E-01

Dans la première colonne du tableau on a porté le numéro correspondant à la pastille, dans la seconde colonne, la densité de la pastille (en pourcentage de la densité théorique) dans la troisième colonne, le diamètre de la pastille et, dans les colonnes suivantes, les paramètres  $f_r$ , dB, Q,  $\epsilon_r$ ,  $\tan \delta$  et  $\epsilon''$  mentionnés plus haut.

De plus, la valeur des différents paramètres indiqués ci-dessus en fonction de la densité des pastilles définie par rapport à la densité théorique ont été reportées sur des graphiques correspondant aux figures 3A, 3B, 3C, 3D, 3E et 3F.

Comme il est visible sur les figures, on obtient dans tous les cas une relation linéaire entre le paramètre et la densité des pastilles.

Il est donc possible d'utiliser, pour effectuer le contrôle de densité des pastilles, non seulement la mesure de la fréquence de résonance mais encore les valeurs calculées du facteur de qualité, de la constante diélectrique relative  $\epsilon_r$ , des pertes diélectriques  $\epsilon''$  ou de la tangente de l'angle de pertes diélectriques qui peuvent être comparées à une valeur prédéterminée correspondant à une valeur limite de la densité du matériau des pastilles.

Les mesures sur chacune des pastilles introduites dans la cavité du résonateur peuvent être réalisées en un temps extrêmement court, de l'ordre de 50 millisecondes maxi. On peut donc envisager un contrôle en continu et à 100% des pastilles de combustible d'une fabrication, avec un bon rendement.

Le procédé de contrôle suivant l'invention peut être mis en œuvre dans une partie quelconque d'une ligne de fabrication d'éléments de combustible, à partir de pastilles de combustible fritté provenant d'une fabrication.

En particulier, le procédé peut être mis en œuvre après une unité de rectification des pastilles, avant le remplissage des gaines des éléments de combustible par les pastilles.

Le procédé suivant l'invention permet en particulier d'éliminer les pastilles dont les densités ne sont pas satisfaisantes.

L'invention ne se limite pas au mode de réalisation qui a été décrit.

On peut utiliser un résonateur d'une forme différente de celle qui a été décrite, la forme et les dimensions du résonateur et en particulier la forme et les dimensions de la cavité du résonateur étant définies en fonction de la forme et des dimensions des éléments dont on réalise le contrôle de densité.

5 De même, on peut réaliser l'excitation du résonateur par un signal haute fréquence d'une manière différente de celle qui a été décrite et détecter le signal représentatif du champ électromagnétique dans le résonateur en présence d'un élément, en utilisant des moyens différents d'une antenne et d'une diode.

10 L'invention peut s'appliquer à des mesures de densité de matériaux compactés et/ou frittés différents de l'oxyde d'uranium ou de tout autre matériau combustible nucléaire, même non conducteurs.



### REVENDECATIONS

1.- Procédé de contrôle de la densité d'éléments (2) de forme et de dimensions sensiblement constantes en un matériau compacté tels que des pastilles de combustible nucléaire de forme cylindrique, caractérisé par le fait qu'on introduit les éléments en continu, l'un à la suite de l'autre, dans une cavité d'un résonateur (1) ayant une forme et une dimension déterminant sa fréquence propre de résonance à vide ( $f_0$ ), adaptées à la forme et à la dimension des éléments (2), qu'on soumet le résonateur (1) à un signal à haute fréquence dont on fait varier la fréquence dans un intervalle prédéterminé, qu'on détecte un signal électrique de sortie du résonateur (1), qu'on détermine la fréquence de résonance ( $f_1$ ) du résonateur (1) en présence de l'élément (2) à partir des variations du signal de sortie, et qu'on détermine, à partir de la fréquence de résonance ( $f_1$ ) du résonateur en présence de l'élément qui est dépendante de la constante diélectrique relative ( $\epsilon_r$ ) du matériau et de la fréquence propre ( $f_0$ ) du résonateur à vide, la valeur ou la conformité par rapport à une valeur de référence, de la densité du matériau des éléments qui est liée à la constante diélectrique ( $\epsilon_r$ ) par une loi de corrélation.

2.- Procédé de contrôle suivant la revendication 1, caractérisé par le fait que, dans le cas d'éléments (2) constitués par des pastilles en oxyde d'uranium  $UO_2$ , on fait varier la fréquence du signal dans un intervalle compris sensiblement entre 2 et 4 GHz.

3.- Procédé de contrôle suivant l'une quelconque des revendications 1 et 2, caractérisé par le fait qu'on détermine, à partir des caractéristiques du pic de résonance du résonateur (1) en présence de l'élément (2), l'un au moins des paramètres suivants : fréquence de résonance du résonateur (1), facteur de qualité Q en présence de l'élément (2), constante diélectrique relative ( $\epsilon_r$ ) du matériau des éléments (2), pertes diélectriques ( $\epsilon''$ ) dans le matériau des éléments (2), tangente  $\delta$  (tangente de l'angle de pertes  $\delta$ ) et qu'on compare la valeur mesurée à une valeur prédéterminée correspondant à une valeur limite de la densité du matériau des éléments (2).

4.- Procédé suivant l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans le cas où les éléments (2) sont des éléments produits en grand nombre par

une fabrication industrielle, par exemple des pastilles en matériau de combustible nucléaire, caractérisé par le fait qu'on réalise un contrôle en continu et à 100 % des éléments (2) de la fabrication industrielle, en introduisant les éléments (2) de manière continue dans la cavité du résonateur (1) et en déterminant la fréquence de résonance ( $f_1$ ) de la cavité (1) du résonateur (1) en présence de chacun des éléments (2) successivement.

5.- Procédé suivant l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé par le fait qu'on calcule la constante diélectrique relative du matériau des éléments (2) par la formule

$$\epsilon_r = 1 + 0,539 \cdot \frac{D^2}{d^2} \cdot \frac{(\Delta f)}{f_0}$$

avec :

D = diamètre du résonateur (1),

d = diamètre des éléments 2,

$f_0$  = fréquence de résonance à vide du résonateur (1),

$\Delta f = f_0 - f_1$ ,

$f_1$  = fréquence de résonance de la cavité du résonateur (1) en présence d'un élément (2) dans la cavité.

6.- Procédé suivant la revendication 5, caractérisé par le fait qu'on détermine l'un au moins des paramètres : densité relative par rapport à la densité théorique, masse spécifique, masse linéique des éléments (2), à partir de la constante diélectrique relative ( $\epsilon_r$ ).

7.- Dispositif de contrôle de la densité d'éléments (2) de forme et de dimension sensiblement constantes en un matériau compacté, tel que des pastilles de combustible nucléaire de forme cylindrique, caractérisé par le fait qu'il comporte un résonateur (1) ayant une cavité dont la forme et la dimension sont adaptées à la forme et à la dimension des éléments (2), un oscillateur (11) à fréquence commandée par une tension électrique, une première antenne capacitive (8) reliée à l'oscillateur (11) et couplée au résonateur (1), une seconde antenne capacitive (10) couplée au résonateur (1) et reliée à un détecteur (12) d'un signal électrique ainsi que des moyens de commande et de calcul (14) pour régler la fréquence de l'oscillateur (11) à

une pluralité de valeurs comprises dans un intervalle de fréquences déterminé et pour analyser le signal électrique du détecteur (12), afin de déterminer la fréquence de résonance du résonateur (1) en présence d'un élément (2) introduit dans la cavité du résonateur.

5            8.- Dispositif suivant la revendication 7, pour le contrôle de pastilles de combustible de forme cylindrique, caractérisé par le fait que le résonateur (1) comporte une cavité cylindrique et des moyens de guidage tubulaire (7a, 7b) des pastilles cylindriques (2) pour les introduire dans une direction axiale (3) dans la cavité du résonateur (1).

10           9.- Dispositif suivant la revendication 8, caractérisé par le fait que le résonateur est constitué par des pièces de cuivre, les surfaces de la cavité ayant un très bon état de surface, obtenu par exemple par électropolissage.

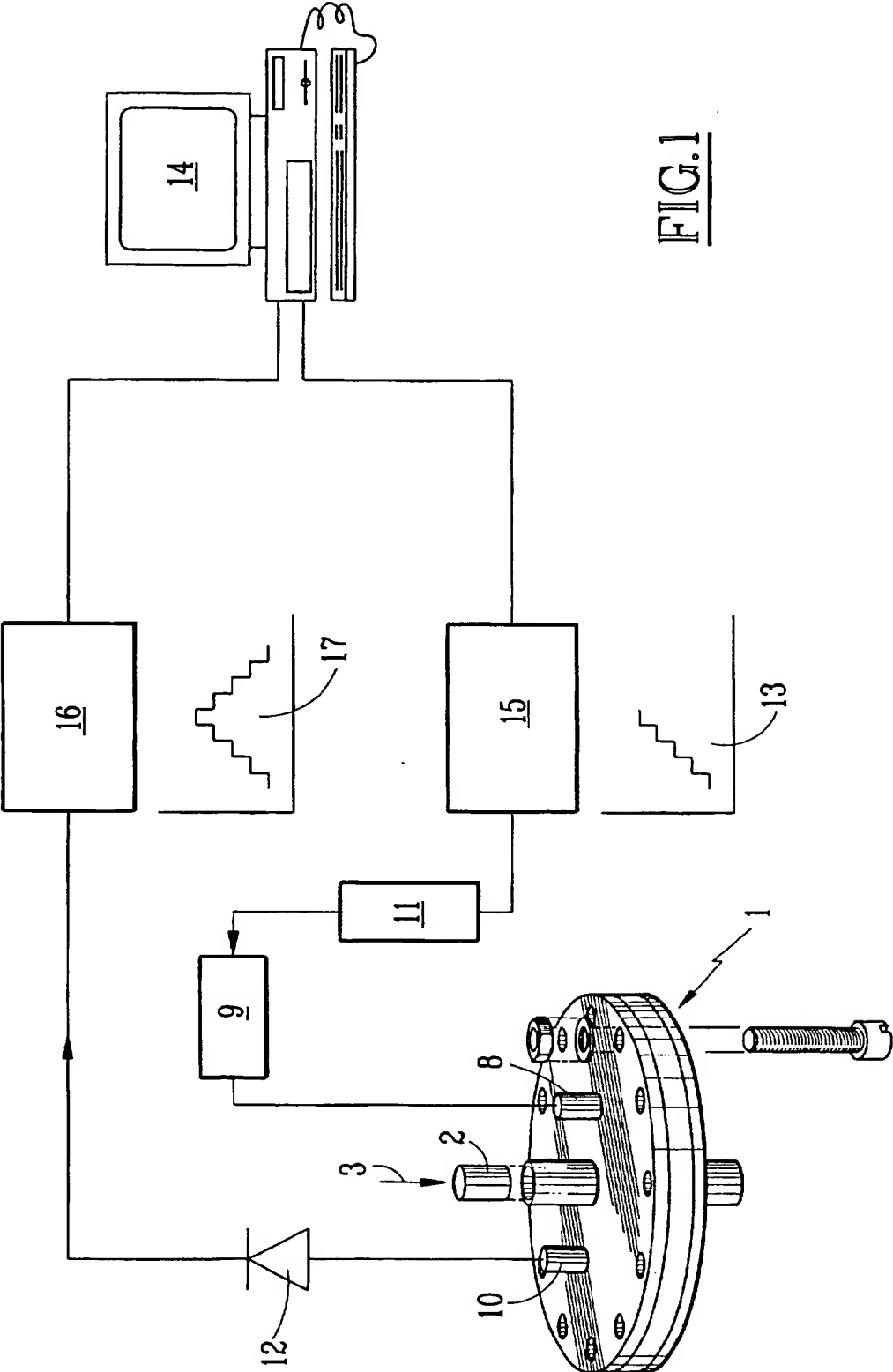
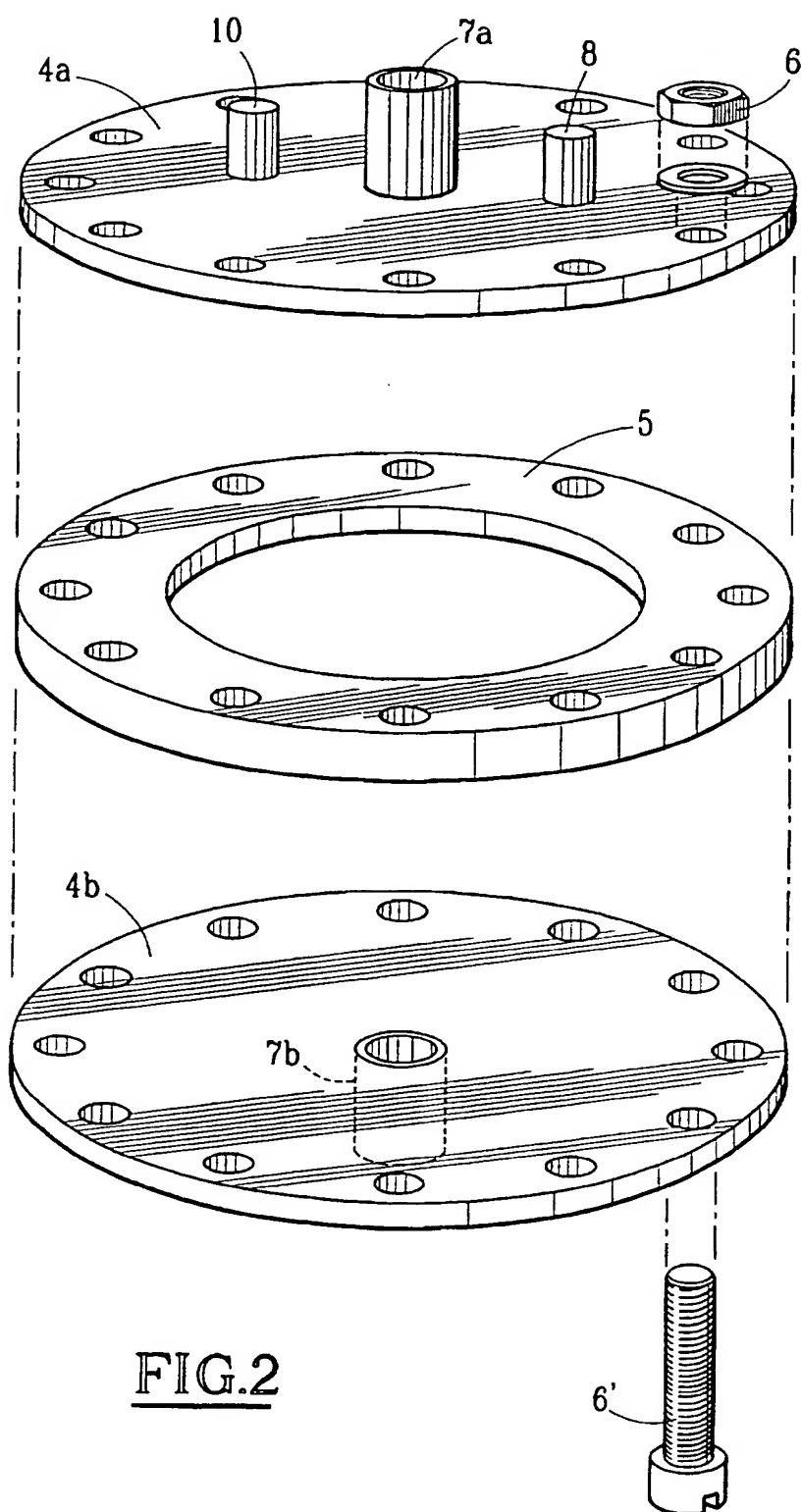
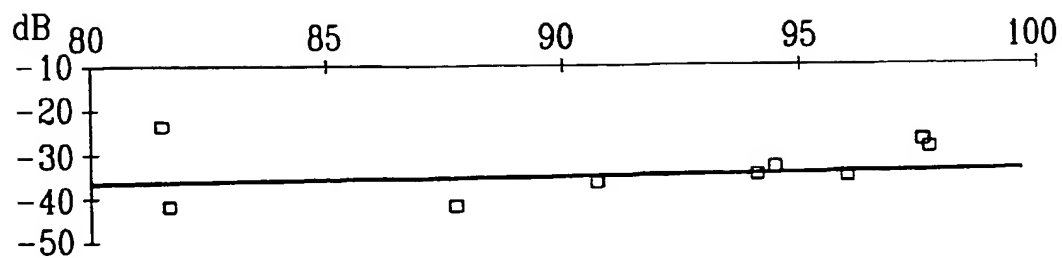
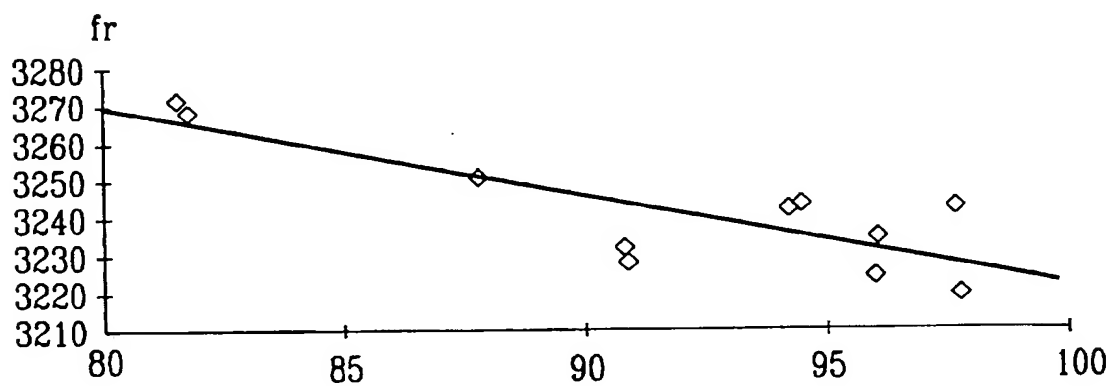
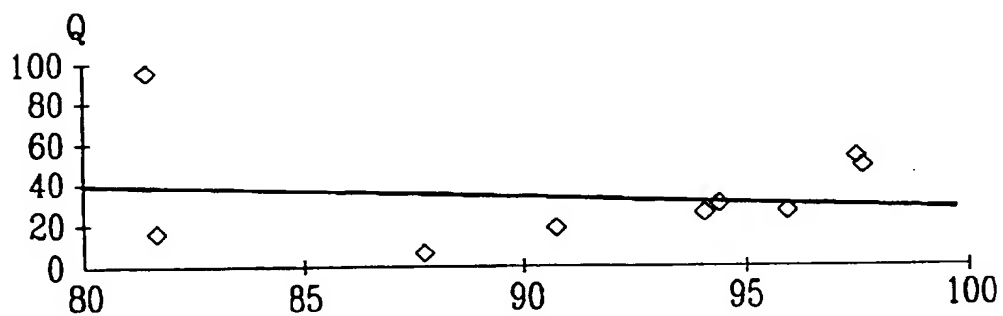


FIG.1

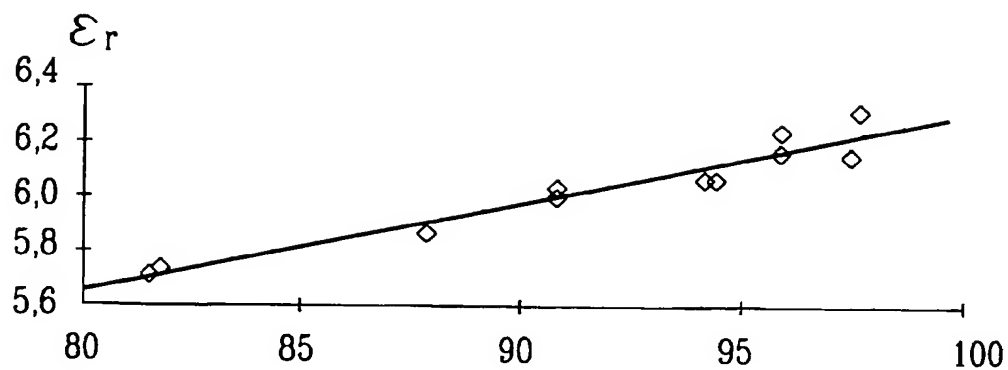
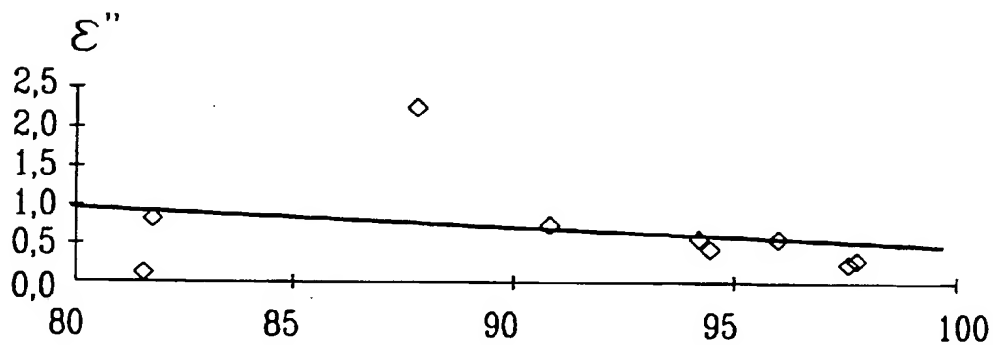
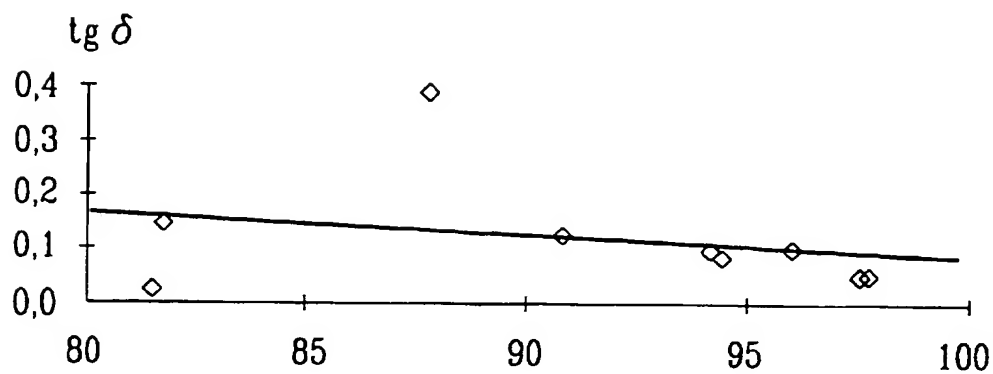
2/4

FIG.2

3/4

FIG.3AFIG.3BFIG.3C

4/4

FIG.3DFIG.3EFIG.3F

[illegible]



INSTITUT NATIONAL  
de la  
PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRELIMINAIRE**  
établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 580972  
FR 9911530

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
A	US 4 193 502 A (MARMO ANTHONY R) 18 mars 1980 (1980-03-18) * abrégé * * colonne 2, ligne 6 - colonne 2, ligne 16 * * colonne 3, ligne 35 - colonne 3, ligne 48 * * colonne 5, ligne 41 - colonne 6, ligne 17 * -----	1,2,7
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.7)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
8 mai 2000		Runser, C
<b>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</b>		
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		
T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant		

1  
EPO FORM 1503 03.82 (P04C13)